УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА

В.В. Щербатов, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин

Томский политехнический университет
E-mail: shervv@mail.tpu.elti.ru

Разработана тепловая математическая модель для определения установившихся температур всего объема ТЭД, которая может использоваться для прогнозирования ресурса по тепловому состоянию изоляции.

Прогнозирование ресурса тяговых электродвигателей (ТЭД) является актуальной задачей в транспортном электромашиностроении, решение которой позволяет определить срок восстановления ТЭД в зависимости от условий эксплуатации. Ресурс ТЭД количественно определяется совокупностью вероятностных характеристик и параметров, отражающих закономерности возникновения отказов в конкретных условиях эксплуатации.

Возможность решения задачи прогнозирования ресурса ТЭД обуславливается тем обстоятельством, что в большинстве случаев их отказы являются следствием постепенного накапливания повреждений, постепенного старения и изнашивания. Понятие [1] «внезапный отказ» относительно, т.к. скачкообразному изменению параметров технических устройств предшествует постепенное изменение каких-либо физических величин, о которых отсутствует информация.

Оценка ресурса становится прогнозируемой, когда на основе анализа физических процессов, изучения закономерностей, которым подчиняется процесс формирования показателей надежности, делается предположение о состоянии надежности изделия.

Тяговые электродвигатели относятся к наиболее нагруженному оборудованию электровозов с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов. Поэтому, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте локомотивов, уровень повреждаемости ТЭД в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким [1].

Повреждаемость в эксплуатации составляет около 20 % по порчам и 30 % по числу заходов на внеплановый ремонт от соответствующих видов отказов по всему оборудованию электровозов. Устранение отказов, а также плановые регламентные ремонтно-восстановительные работы и текущее обслуживание щеточно-коллекторного узла, изоляционных конструкций и подшипниковых узлов составляют основную долю затрат по содержанию тяговых двигателей в эксплуатации.

Статистика отказов по локомотивному депо ст. Тайга (журнал учета) показывает, что наиболее

часто двигатели попадают в ремонт по следующим причинам:

- пробой изоляции и межвитковые замыкания обмотки якоря – 16...25 %;
- пробой изоляции и межвитковые замыкания главных и дополнительных полюсов и компенсационной обмотки – 12...16 %;
- нарушение коммутации (круговой огонь) – 8...16 %;
- повреждение якорных подшипников – 14...16 %;
- нарушение распайки соединений обмотки якоря в петушках коллектора – 5...6 %.

Для решения задачи прогнозирования ресурса необходимо создание математической модели, которая описывает закономерности изменения свойств материалов основных узлов тягового электродвигателя. Как видно из статистики отказов, основной вид повреждения ТЭД – это пробой изоляции (до 40 %), поэтому температурный фактор является определяющим для его ресурса. Превышение температуры на 10 °С (для класса изоляции В) снижает ресурс изоляции в два раза. Таким образом, для прогнозирования ресурса ТЭД очень важно иметь объективную информацию о температурном поле во всем его объеме.

В связи с этим система прогнозирования ресурса тягового электродвигателя представляется как совокупность вычислительно-программных средств, в числе которых важное место занимает тепловая математическая модель, позволяющая определить температуру всех частей тягового электродвигателя, и модель, описывающая закономерность изменения свойств изоляции от температуры.

Эта закономерность лучше других поддается количественному учету, поэтому она сравнительно хорошо исследована.

Математическая зависимость ресурса L от температуры ϑ представлена как $L = Ae^{B/\vartheta}$ или $\lg L = A' + B'/\vartheta$ где A, B, A', B' – постоянные.

Нагрев также лежит в основе многообразных термохимических, термофизических и термомеханических явлений, которые могут угрожать жизнеспособности конструкции. Опасность немедленного или отсроченного повреждения машины связана не только с уровнем достигнутой температуры, но и с пространственными температурными градиентами, длительностью и частотой температурных воздействий, скоростью нагревания или охлаждения и т.п. Отсюда вытекает необходимость в достоверной и подробной информации о распределении температуры в электрической машине при различных режимах ее работы.

Получение экспериментальной информации требует присутствия в машине средств измерения температуры. Текущие измерения температуры в эксплуатационных режимах выполняются с целью предупреждения аварийных ситуаций и предполагают сопоставление достигнутых температур с предельно допустимыми безотносительно к параметрам режима.

Подробную информацию о температурном поле машины можно получить теоретическим путем на основе уравнения теплопроводности. Действительно, корректная математическая модель обеспечивает полную картину поля, если имеются надежные сведения о распределении потерь, свойствах материалов и течении охлаждающих агентов.

В задачи теплового расчета входит определение средней температуры активных частей машины, вычисление тепловых потоков между смежными элементами конструкции, т.е. расчет поля температуры в машине для номинального режима работы. Для ТЭД номинальным является продолжительный режим работы. Многочисленные теоретические разработки, применяемый математический аппарат и большое число экспериментальных исследований принципиально позволяют производить тепловой расчет с большой точностью.

Исходными данными для теплового расчета служат: распределение потерь энергии по объему машины, значения физических величин, в первую очередь теплопроводности и теплоемкости, и условий охлаждения на граничных поверхностях.

Для расчета температур активных частей ТЭД используется метод тепловых схем замещения [5], основанный на уравнении теплообмена (закон Фурье):

$$P = \frac{\lambda S_{ср} \Delta\vartheta}{\delta} = \frac{\Delta\vartheta}{R_\lambda},$$

где P – потери энергии; $S_{ср}$ – средняя площадь теплопередающей поверхности; λ – коэффициент теплопроводности; $\Delta\vartheta$ – падение температуры на длине δ; R_λ – тепловое сопротивление данного участка пути теплового потока.

Исходя из того, что обмотки полюсов не оказывают влияние на нагрев якоря [2], предложенные схемы [3–5] для отображения общей картины тепловых процессов объединены в единую, с опорным узлом (общей точкой) по внутреннему воздуху.

Развернутая тепловая схема замещения ТЭД, состоящая из 7 самостоятельных источников тепла, приведена на рис. 1: Р1 – потери в меди главных полюсов; Р12 – потери в меди дополнительных полюсов; Р9 – потери в меди компенсационной обмотки; Р3 – потери в стали полюсного наконечника; Р14 – потери на коллекторе; Р16 – потери в меди якоря; Р18 – потери в стали сердечника якоря.

На рис. 1, рассмотрены пути теплопередачи, представленные тепловыми сопротивлениями: R1 – от меди катушек главного полюса (г.п.) к внутреннему воздуху (в.в.); R2 – от меди катушек г.п. к стали через изоляцию; R3 – от стали г.п. к в.в.; R4 – от стали г.п. к остову; R5 – от меди катушек компенсационной обмотки к полюсу через изоляцию; R6 – от внутренней поверхности остова к в.в.; R7 – от стали дополнительного полюса (д.п.) к ос-

тову; R8 – от наружной поверхности остова к воздуху; R10 – от меди катушек д.п. к полюсу через изоляцию; R11 – от стали д.п. к в.в.; R12 – от меди катушек д.п. к в.в.; R141 – от поверхности коллектора к в.в.; R142 – от пластин коллектора по площади соприкосновения с нажимными конусами кольца и втулки; R143 – от внутренних каналов коллектора к в.в.; R144 – от манжеты коллектора к в.в.; R15 – от меди обмотки якоря с пазовой части на коллектор; R161 – от наружной поверхности лобовых соединений якоря к в.в.; R162 – от обмоткодержателей лобовых соединений якоря к в.в.; R17 – от пазовой изоляции якоря; R181 – от наружной поверхности зубцов якоря к в.в.; R182 – от поверхности вентиляционных каналов якоря к в.в. R13 учитывает среднее превышение температуры воздушного потока внутри машины над температурой окружающего воздуха.

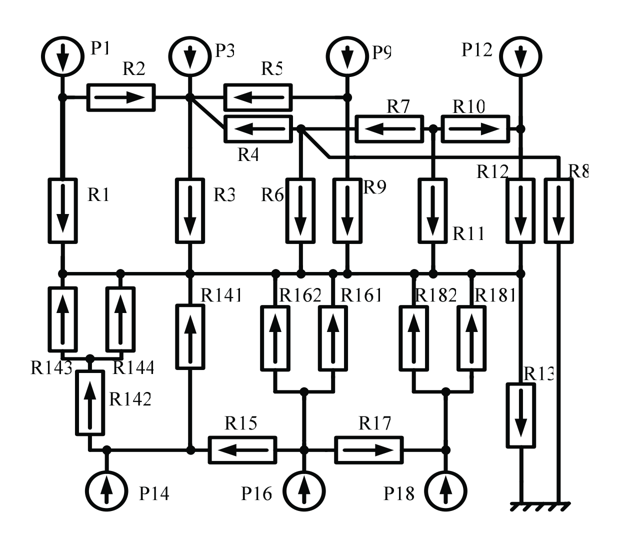


Рис. 1. *Развернутая тепловая схема замещения ТЭД*

На основании приведенной тепловой схемы составлена система уравнений, представленная ниже в матричной форме и реализованная в среде MATLAB.

Разработанная модель рассчитывает установившиеся температуры ϑ_i узлов ТЭД постоянного тока, учитывает температуру окружающей среды и производительность вентилятора воздушного принудительного охлаждения.

В качестве примера произведен расчет ТЭД ТЛ-2К1 мощностью при длительном режиме 575 кВт с изоляцией обмотки якоря класса В, обмотки возбуждения – F, установленный на электровозах ВЛ-10. Результаты расчета нагрева обмоток в сравнении с экспериментальными данными [6] приведены в табл. Здесь же приведена погрешность расчета с использованием математической модели.

Таблица. *Результаты расчета ТЭД ТЛ-2К1 при номинальном токе 400 А*

Участки машины	Температура, °С		Погрешность, %
	Расчетная	По [6]	
Обмотка якоря	97,65	94	3,74
Обмотка возбуждения	143,74	142	1,2
Обмотка дополнительных полюсов	106,43	102	4,16
Компенсационная обмотка	96,65	93	3,78
Коллектор	62,04	–	–

Расхождение результатов расчета с результатами испытаний не превышают 5 %.

Разработанная тепловая модель может применяться для других типов ТЭД и позволяет в кратчайшее время рассчитать установившееся тепловое поле любой машины при введении соответствующих параметров.

Прогнозирование ресурса ТЭД может осуществляться как в процессе его разработки, так и в период эксплуатации. В последнем случае целью прогнозирования является своевременное обнаружение неблагоприятного состояния двигателя и разработка рекомендаций по повышению его ресурса.

Рассмотрим применение алгоритма прогнозирования ресурса ТЭД по тепловому состоянию на примере изоляции якоря ТЭД ТЛ-2К1.

$$\begin{bmatrix}
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\
R1 & -R2 & -R3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & R3 & -R4 & 0 & -R6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -R3 & 0 & -R5 & 0 & 0 & 0 & R9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R10 & -R11 & R12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R6 & -R7 & 0 & 0 & 0 & R11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R6 & 0 & R8 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R14 & R15 & -R16 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R16 & -R17 & -R18
\end{bmatrix}
\cdot
\begin{bmatrix}
\vartheta 1 \\ \vartheta 2 \\ \vartheta 3 \\ \vartheta 4 \\ \vartheta 5 \\ \vartheta 6 \\ \vartheta 7 \\ \vartheta 8 \\ \vartheta 9 \\ \vartheta 10 \\ \vartheta 11 \\ \vartheta 12 \\ \vartheta 13 \\ \vartheta 14 \\ \vartheta 15 \\ \vartheta 16 \\ \vartheta 17 \\ \vartheta 18
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
P1 \\ P3 \\ P9 \\ P12 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P14 \\ P16 \\ P18 \\ 0 \\ 0
\end{bmatrix}$$

Один из материалов корпусной изоляции якоря ТЛ-2К1 – стеклолента толщиной 0,1 мм, теплопроводностью 0,23 Вт/(м·К), уложенная в один слой с перекрытием в половину ширины ленты.

Данная изоляция относится к классу нагревостойкости В. При испытаниях образцов данного материала был определен ресурс изоляции, он составляет 20000 ч при 120 °С.

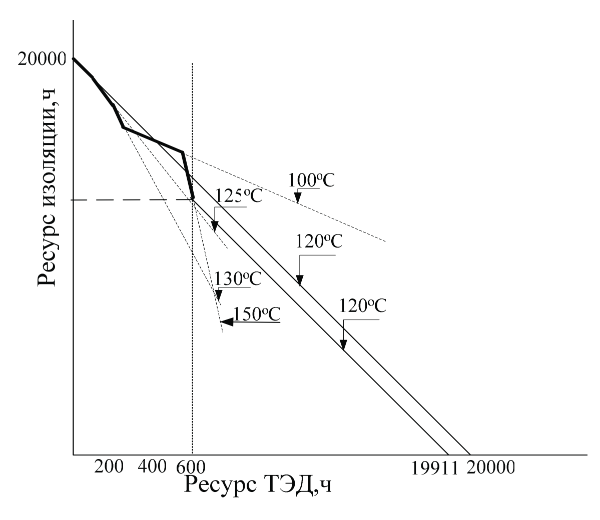


Рис. 2. *Иллюстрация расчета прогнозирования ресурса ТЭД по тепловому состоянию*

При эксплуатации в результате мониторинга получены данные по максимальным температурам якоря за время работы ТЭД 600 ч, рис. 2.

После обработки данных ресурс изоляции якоря составил 19911 ч при 120 °С. Рисунок наглядно подтверждает правило 10 °С для изоляции класса В.

Данная модель представляет стационарный процесс. Находится наиболее нагретый узел и по его средней температуре делается предположение, что ресурс будет такой, как показывает наклонная линия. После этого производится расчетная корректировка наклона линии и новый прогноз ресурса изоляции.

Задача определения текущих максимальных значений температуры требует создания модели динамического процесса на основе дифференциальных уравнений. Для этого необходимы дальнейшие эксперименты и расчеты.

Таким образом, наличие тепловой математической модели позволит реализовать алгоритм прогнозирования ресурса ТЭД на локомотивах. Разработанная тепловая математическая модель позволяет с достаточной точностью рассчитать установившиеся температуры разных узлов ТЭД, определить температуру недоступных для непосредственного измерения частей в период эксплуатации. Это предполагает использование тепловой модели при мониторинге ТЭД с целью прогнозирования ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава / Под ред. Е.М. Зубкович. – М.: Транспорт, 1992. – 295 с.
2. Богаенко И.Н. Обобщенные и местные коэффициенты теплоотдачи тяговых двигателей магистральных электровозов // Электричество. – 1966. – № 1. – С. 40–46.
3. Проектирование тяговых электрических машин / Под ред. М.Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
5. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: Энергия, 1967. – 432 с.
6. Электровоз ВЛ10. Руководство по эксплуатации / Под ред. Н.И. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1975. – 326 с.
7. Тяговые двигатели электровозов / Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 627 с.
8. Исмаилов Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока. – Омск, 2001. – 75 с.